



Full Length Research Paper

Hydrochimie des eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville : Origine et processus de minéralisation

Olivier Florent ESSOULI ^{1*}, Timothée MIYOUNA ¹, Primaèle ESSOULI KESSIMPOU, Florent BOUDZOU MOU ^{1,2}, Laurent MATINI ³, Serigne FAYE ⁴

¹Université Marien NGOUABI, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de Géosciences, B.P. 69 Brazzaville, République du Congo

²Institut National de Recherches en Sciences Naturelles et Exactes, Laboratoire de Géosciences, B.P. 2400, Brazzaville, République du Congo

³Université Marien NGOUABI, Ecole Normale Supérieure, Laboratoire de Chimie, B.P. 69 Brazzaville, République du Congo

⁴Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, B.P. 743 Dakar-Fan, Sénégal

Received April 2020 – Accepted November 2020



*Corresponding author: oflorentessouli@gmail.com

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé / Abstract:

La présente étude est basée sur l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface et souterraines dans la partie nord de Brazzaville. L'étude physico-chimique des eaux de surface et souterraines a révélé que ces eaux sont douces, faiblement minéralisées et sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite, l'aragonite, la calcite, la dolomite et du gypse. Les valeurs de pH enregistrées, indiquent que les eaux sont acides dans l'ensemble pour les campagnes de prélèvements de janvier 2014 et mai 2015 et acides à légèrement basiques pour la campagne de décembre 2016. La projection des points d'eau sur le diagramme triangulaire de Piper, fait ressortir essentiellement deux familles chimiques : les eaux chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes et les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes. La minéralisation des eaux de surface et souterraines serait contrôlée par les phénomènes de dissolution et les échanges de bases cationiques entre la nappe et les permutolites

Mots clés/Keyword: Hydrochimie, faciès chimique, minéralisation, eaux souterraines, eaux de surface, Brazzaville.

Cite this article:

Olivier Florent ESSOULI, Timothée MIYOUNA, Primaèle ESSOULI KESSIMPOU, Florent BOUDZOU MOU, Laurent MATINI, Serigne FAYE (2020). Hydrochimie des eaux de surface et souterraines de la partie Nord de Brazzaville : origine et processus de minéralisation. *Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing.*, Vol. 2(1), pp. 1-15. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

L'alimentation des populations en eau de bonne qualité constitue un défi majeur pour les pouvoirs publics. L'eau est la vie, sans une eau saine, il est impossible d'envisager le développement et l'épanouissement des populations. Le développement exponentiel de la plupart des villes africaines accompagné d'une croissance démographique très rapide pose non seulement le problème de la disponibilité de la ressource en eau, mais aussi celui de sa qualité. Le Congo Brazzaville ne fait pas exception à la règle, il

connait depuis plusieurs décennies une importante croissance démographique qui s'est accompagnée d'un exode rural massif qui a eu pour conséquence l'augmentation de la densité urbaine et l'occupation parfois anarchique des sols qui sont alors soumis à des actions et effets anthropiques multiples. Les eaux souterraines et de surface en milieu urbain subissent de multiples contraintes dues à une forte croissance démographique et à l'inadaptation ou même l'absence d'assainissement. Les réseaux d'égouts, les fosses septiques, les eaux usées des usines et les déchets solides sont les sources potentielles de pollution des

eaux souterraines dans le secteur urbain, les zones périurbaines. L'agriculture, via les intrants agricoles, le sous-sol constitué essentiellement des sédiments silico-clastiques très perméables et favorables aux infiltrations dans la partie nord de Brazzaville, peuvent contribuer aussi à la dégradation de la qualité des eaux. En plus, l'eau souterraine au cours de son séjour et de son circuit dans les formations géologiques perméables, subit des échanges géochimiques avec le réservoir. Les interactions eau-roche modifient les caractéristiques de l'eau [1]. Ainsi, les caractéristiques physico-chimiques dépendent entre autres de la composition chimique et minéralogique des terrains traversés.

A Brazzaville, le réseau de distribution d'eau ne pouvant couvrir tous les quartiers de la ville, certaines populations font recours à l'eau de puits et de forages pour satisfaire leurs besoins quotidiens. L'accès à l'eau potable constitue un problème majeur dans les pays en voie de développement d'Afrique comme le Congo.

Dans le secteur couvert par cette étude, les eaux souterraines ont été toujours une source importante d'approvisionnement en eau potable des populations. Cependant, la qualité alimentaire de l'eau demeure préoccupante pour la santé des populations qui consomment cette ressource.

Les ressources en eau souterraine de la République du Congo n'ont jamais fait l'objet d'une évaluation complète ou systématique [2]. La présente étude se veut une contribution à la connaissance des caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines et de surface dans la partie nord de Brazzaville et, elle se propose de déterminer l'origine et les processus de minéralisation des eaux.

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation générale de la zone d'étude

La ville de Brazzaville est située sur la rive droite du fleuve Congo et elle s'étend sur 30 km et recouvre une superficie de 115 km². Elle est limitée au nord-est par le plateau Batéké et la rivière Djiri, au sud et à l'est par le fleuve Congo à l'ouest par la rivière Maloto (Fig. 1). Elle se situe entre les Latitudes 4°10' et 4°17' Sud et les Longitudes 15°16' et 15°45' Est. La ville compte 9 arrondissements : Baongo, Talangai, Makélékélé, Mfilou, Ouenzé, Moungali, Madibou, Djiri et Poto-poto [4].

2.1.1. Contexte géologique

La géologie du nord de Brazzaville est constituée par la série du Stanley-Pool et celle des Plateaux Batéké (Fig. 2). La série du Stanley-Pool est constituée des formations sédimentaires continentales silico-clastiques d'âge Jurassique supérieur à Crétacé. Elle affleure dans plusieurs ravins et repose en discordance de ravinement sur les grès arkosiques de couleur lie-de-vin d'âge Paléozoïque du Groupe de l'Inkisi [5];[6].

Selon [7], [5] et [8], la série du Stanley-Pool est subdivisée en trois niveaux : le niveau inférieur (SP1) d'environ 10 m est connu par sondage au port de Kinshasa et dans le ravin de Makélékélé. Ce niveau fossilifère comporte des argilites rouge à passées

gréseuses abondantes vers le haut, superposé à des marnes plus ou moins sableuses de teinte analogue.

Ces argilites sont silteuses et stratifiées (alternance de lits rouges et de lits jaune ocre [10] ; le niveau moyen (SP2), d'une épaisseur d'au moins 20 m, est constitué de grès tendres blancs localement indurés à stratifications entrecroisées [5]. Ce niveau est riche en feldspaths et est silicifié dans sa partie supérieure formant des dalles silicifiées. Les niveaux 1 et 2 constituent l'aquifère dans toute la ville de Brazzaville ; le niveau supérieur (SP3), d'environ 90 m de puissance [11] et [5] est formé de grès blanc silteux très tendres, riches en kaolinite et à stratifications entrecroisées.

La série des plateaux Batéké surmonte la série du Stanley-Pool par une discordance de ravinement parfois difficile à mettre en évidence [12]. Elle est constituée de sables éoliens localement silicifiés. Cette série comprend deux niveaux : le niveau inférieur (Ba1) et le niveau supérieur (Ba2). Le niveau inférieur est constitué de grès tendres d'âge paléogène. Le niveau supérieur est constitué des sables fins, argileux et silteux, jaune ocre d'âge Néogène. Le sable jaune ocre argilo-silteux est actuellement stratigraphiquement séparé de la série des Plateaux Batéké, et est appelé la "Formation de couverture" [13] ; [14]. Le sable fin jaune ocre, argilo-silteux constitue la couverture de toutes les formations anciennes dans notre zone d'étude

2.1.2. Hydrologie et hydrogéologie

L'étude stratigraphique laisse entrevoir a priori une succession hydrogéologique d'ensemble assez simple où les aquifères non confinés (nappes libres) sont principalement constitués d'alluvions quaternaires, de sable et grès tendres des séries Batéké et de grès continentaux du Stanley Pool [2].

En effet, la région de Brazzaville fait partie du vaste ensemble hydrogéologique des plateaux Batéké. C'est un véritable château d'eau d'où sont issus bon nombre des grands cours d'eau du Congo et du Gabon (Niari, Léfini, Ogooué, etc.). Les niveaux aquifères sont constitués par les sables fins, graviers et grès tendres. Leur épaisseur, très variable, peut atteindre 100 m en certains endroits. L'aquifère est par endroit interrompu par des lentilles d'argile ou des bancs de grès silicifiés donnant naissance à quelques sources de contact très localisées. Sa limite supérieure est constituée par la surface piézométrique de la nappe. Les débits sont généralement très faibles (de l'ordre de 0,01 L/s). Cette nappe alimente plusieurs cours d'eau pérenne, et de nombreux puits traditionnels la captent dans les banlieues de Brazzaville. L'alimentation directe de la nappe par la pluie se fait sur toute sa superficie [2].

Cependant, l'exploitation des fiches techniques des forages d'eau fournies par les sociétés de réalisation des forages (BCBTP, SOPEX CONGO et FORECO) laisse entrevoir une succession hydrogéologique assez simple, dont on dispose de la base vers le sommet des grès, des sables et enfin des argiles. Les sables sont pour la plupart argileux et les argiles sont sableuses. Les fiches techniques des forages d'eau décrites permettent de dire que : le substratum du système

aquifère de la région de Brazzaville est formé par les argilites de la série du Stanley-Pool inférieure et les grès arkosiques de l'Inkisi. En outre, les forages les plus profonds sont observés dans les quartiers périphériques (Nkombo, Massengo, Kintélé) où les

profondeurs forées peuvent dépasser 180 m (nos propres observations).

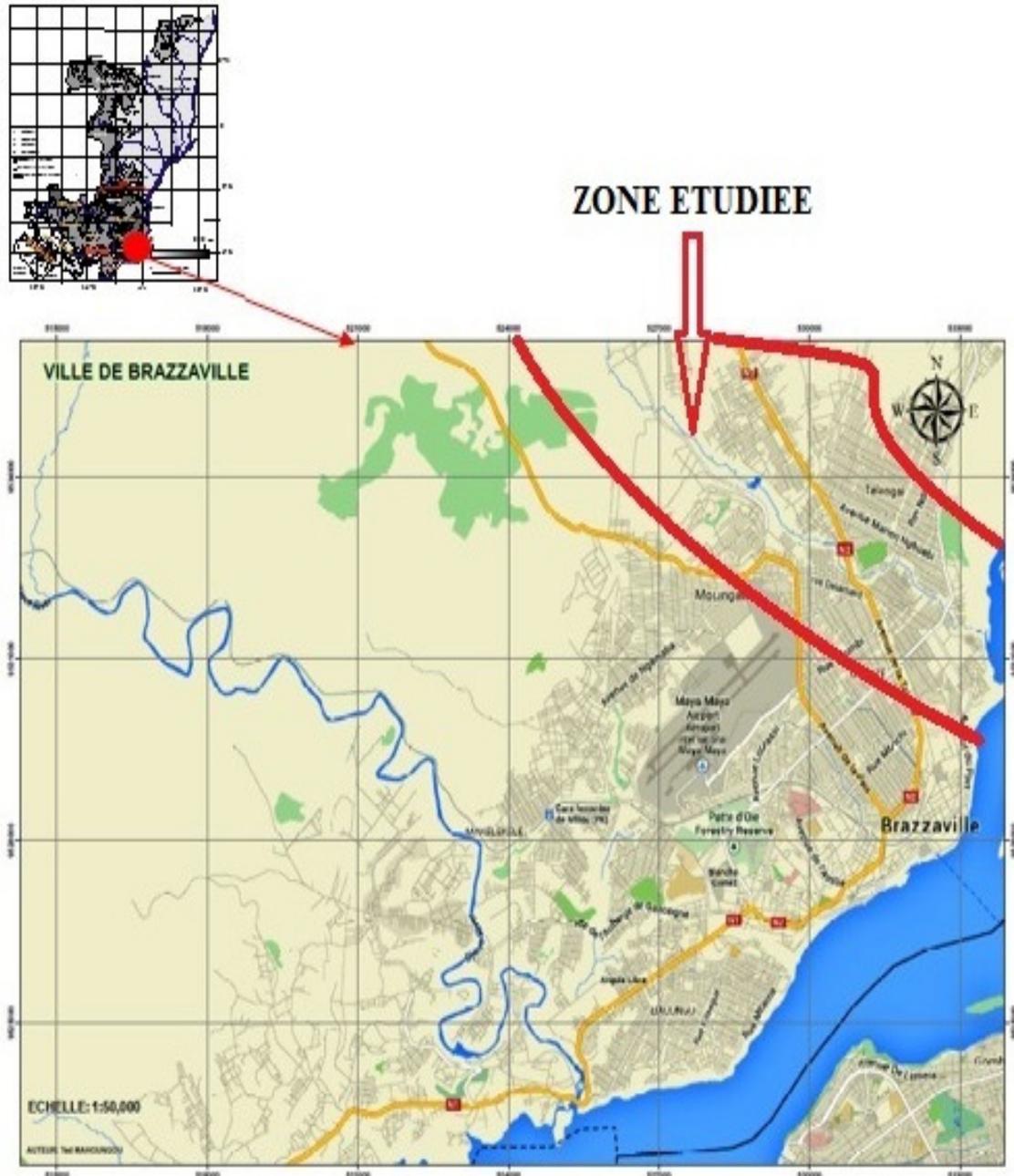


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude [3].

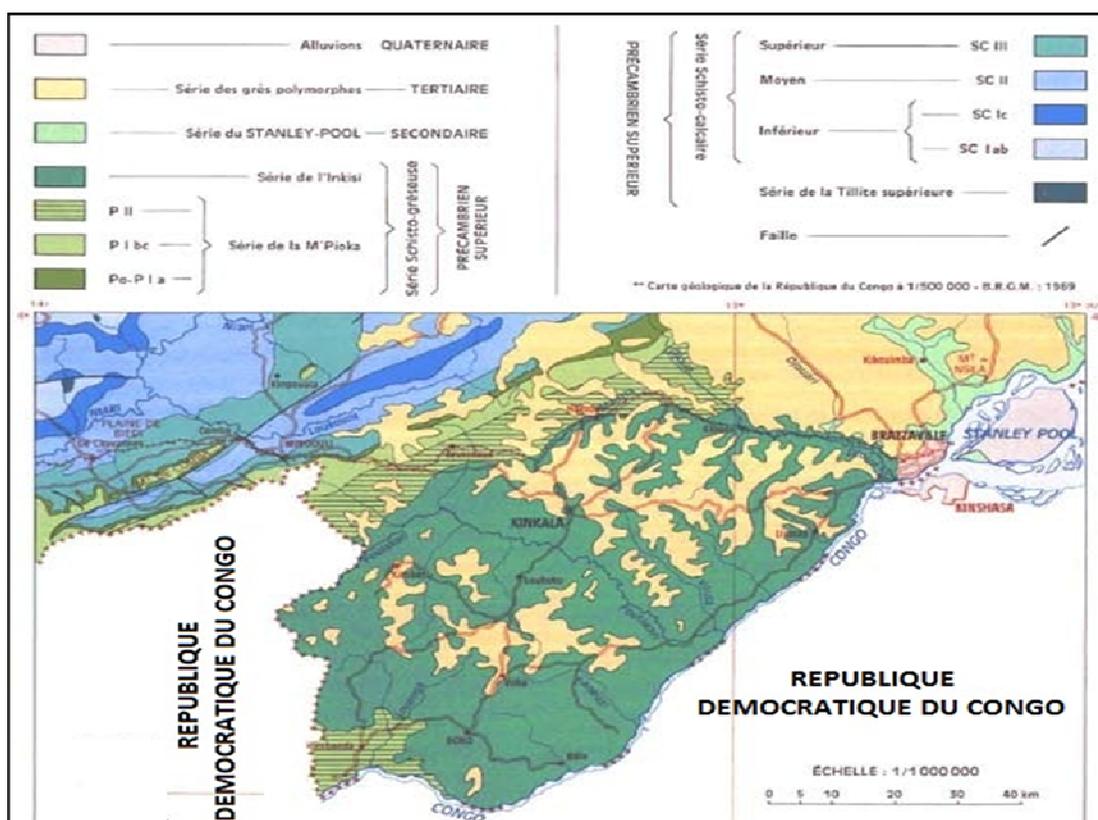


Figure 2. Carte géologique de Brazzaville [9].

2.2. Méthodologie utilisée

La méthode de travail a consisté au prélèvement des échantillons d'eau sur le terrain ; au travail au laboratoire et au traitement, analyse et l'interprétation des résultats.

2.2.1. Le prélèvement des échantillons

Le prélèvement des échantillons s'est effectué en trois campagnes : janvier 2014 ; mai 2015 ; et décembre 2016 ; Deux types d'eaux ont été prélevés : les eaux de surface (rivières) et les eaux souterraines (forage, puits). Un total de vingt-six (26) points d'eau a été prélevé. Les points d'eau échantillonnés ont été localisés en coordonnées géographiques à l'aide d'un GPS et sont situés sur la carte de localisation (Fig. 3). L'échantillonnage a été réalisé sur les eaux souterraines captées par les forages, les puits traditionnels et les eaux de surface (Fig. 4).

Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Tous les prélèvements ont été effectués entre 6 h 30 min et 11 h 30 min.

Les échantillons d'eaux prélevées sont transportés au laboratoire dans une glacière à une température environ de 4 à 8 °C pour analyser dans les heures qui suivent le prélèvement.

2.2.2. Analyses physico-chimiques

Au laboratoire, on a procédé à la détermination du pH et de la conductivité électrique ainsi qu'à l'analyse chimique des éléments suivants : Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , PO_4^{3-} , F^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Pb^{2+} , Fer total (Fe_{Tot}) et Cr^{6+} .

Les analyses chimiques des ions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , F^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Pb^{2+} , Fer total (Fe_{Tot}) et Cr^{6+} des eaux échantillonnées ont été effectuées par chromatographie ionique et celles des ions bicarbonates (HCO_3^-) par titrimétrie.

2.2.3. Traitement des données hydrochimiques

Le traitement des données collectées sur les eaux souterraines et de surface a été réalisé à l'aide des méthodes d'interprétation des données hydrochimiques :

- des diagrammes triangulaires de [15] permettant de connaître la typologie des eaux souterraines et de surface étudiée ;
- des diagrammes binaires permettant de comprendre l'origine et les processus de la minéralisation des eaux souterraines et de surface ;
- le diagramme de [16] a été construit dans le but de classer les eaux souterraines et de surface et d'identifier les différents processus intervenant dans la minéralisation des eaux souterraines et de surface de la partie nord de Brazzaville.

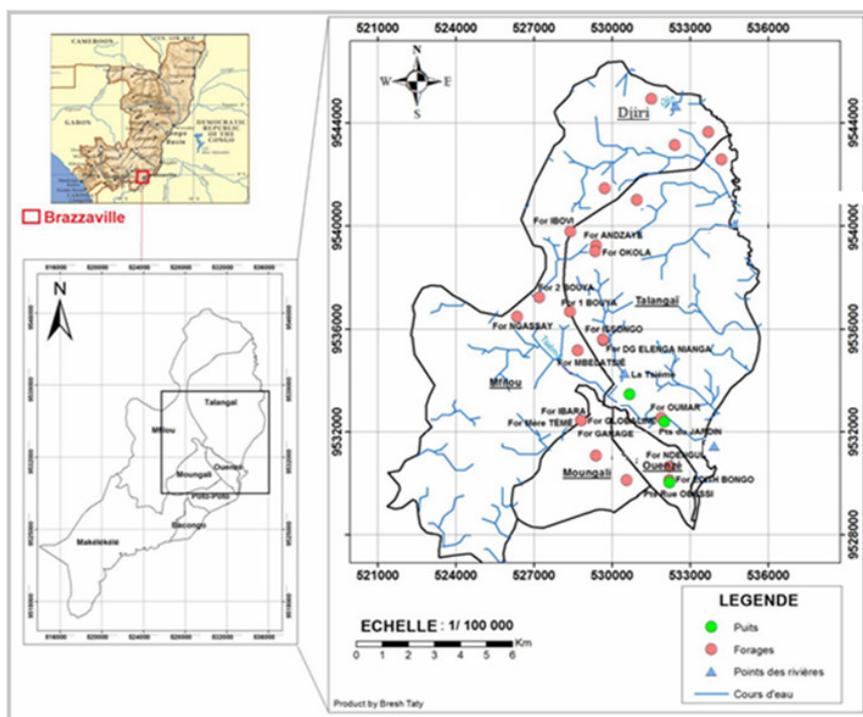


Figure 3. Localisation des points d'eau échantillonnés [3]



Figure 4. Différents points d'accès à la ressource [3]

La précision des analyses chimiques est liée aux méthodes analytiques et aux concentrations. Les méthodes utilisées et les limites de détection varient selon le laboratoire d'analyse. Le calcul d'erreur sur la balance ionique qui est l'écart relatif entre la somme des cations et la somme des anions permet de vérifier la précision des méthodes analytiques mises en œuvre et la validité des déterminations chimiques [17], [18]. Si l'écart relatif est inférieur à 5 %, les analyses peuvent être considérées comme bonnes. Lorsque sa valeur est comprise entre 5 % et 10 %, les analyses peuvent à la rigueur être retenues. Au-delà de 10 %, les analyses doivent être rejetées. Deux causes peuvent dans ce cas être invoquées : les méthodes analytiques sont peu précises ou un ou plusieurs éléments en solution n'ont pas été dosés. Un contrôle systématique de l'erreur relative sur la balance ionique a été réalisé au laboratoire pour l'ensemble des analyses chimiques de cette étude. Les erreurs relatives calculées sont inférieures ou égales à 5 %, ce qui témoigne d'une bonne qualité des analyses et, elles peuvent être traitées sans restriction à l'aide des différents logiciels de traitement des données hydrochimiques comme Diagramme développé par le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon en France et Microsoft Excel.

3. Résultats et discussions

3.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les paramètres statistiques (minimum, maximum, moyenne, écart-type et coefficient de variation) qui caractérisent la distribution, sont calculés pour chacune des variables physico-chimiques (Tab. 1).

Le coefficient de variation (CV) est le rapport de l'écart type sur la moyenne arithmétique. C'est un paramètre de mesures de la dispersion d'une série d'observations d'une variable autour de sa moyenne arithmétique. Si la valeur du CV est inférieure à 50 %, la variable observée a une distribution homogène autour de sa moyenne arithmétique et si la valeur du CV est supérieure à 50 %, la variable observée a une distribution hétérogène autour de sa moyenne arithmétique [19].

Les résultats obtenus montrent que les variables physico-chimiques comme Na^+ , Cl^- et NO_3^- ont une distribution géographique hétérogène ($\text{CV} > 50\%$) et les variables physiques (pH, CE et TDS) les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} et HCO_3^-) ont une distribution homogène ($\text{CV} < 50\%$) au cours des trois campagnes (janvier 2014, mai 2015 et décembre 2016). Les valeurs de pH comprises entre 4,88 (F-15) et 8,01 (F-08, F-17) pour la campagne de décembre 2016, de 4,12 (F-09) à 5,58 (PTS-02) pour la campagne de mai 2015 et de 4,01 (ES-02) à 6,8 (F-04) pour la campagne de janvier 2014. Ces valeurs de pH enregistrées indiquent que les eaux sont dans l'ensemble acides à légèrement neutres.

La minéralisation d'une eau peut être évaluée par sa conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$) ou par le taux de solides dissous (TDS en mg/L). Ces deux paramètres dépendent de la quantité d'ions contenus dans cette eau. En fonction des valeurs du TDS, on peut

distinguer : les eaux douces ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg}/\text{L}$) ; les eaux saumâtres ($1000 < \text{TDS} < 10\,000 \text{ mg}/\text{L}$) ; les eaux salines ($10\,000 < \text{TDS} < 100\,000 \text{ mg}/\text{L}$) et les saumures ($\text{TDS} > 100\,000 \text{ mg}/\text{L}$) [20].

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux souterraines sont très hétérogènes. Ces valeurs de la conductivité électrique des eaux indiquent que celles-ci sont faiblement à moyennement minéralisées avec des valeurs qui oscillent entre $18 \mu\text{S}/\text{cm}$ (F-19) et $41 \mu\text{S}/\text{cm}$ (ES-03) pour la campagne de décembre 2016, de $14 \mu\text{S}/\text{cm}$ (F-09) à $40 \mu\text{S}/\text{cm}$ (F-03, F-04, F-15, F-21) pour la campagne de mai 2015 et de $2 \mu\text{S}/\text{cm}$ (ES-03) à $360 \mu\text{S}/\text{cm}$ (PTS-01) pour la campagne de janvier 2014. Les teneurs mesurées durant la campagne de janvier 2014 se différencient de celles mesurées lors des campagnes de mai 2015 et décembre 2016. Les valeurs de la minéralisation des eaux varient de $82 \text{ mg}/\text{L}$ (F-13) à $170 \text{ mg}/\text{L}$ (F-03), pour la campagne de décembre 2016, de $91 \text{ mg}/\text{L}$ (F-14) à $148 \text{ mg}/\text{L}$ (F-17) pour la campagne de mai 2015 et de $76 \text{ mg}/\text{L}$ (ES-02) à $154 \text{ mg}/\text{L}$ (F-08) pour la campagne de janvier 2014. On pourrait donc dire que ces eaux analysées sont très faiblement minéralisées et sont dans l'ensemble douces ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg}/\text{L}$).

Les teneurs en calcium des eaux sont comprises entre $3,87 \text{ mg}/\text{L}$ (ES-02) et $23 \text{ mg}/\text{L}$ (F-02) pour la campagne de décembre 2016, entre $9 \text{ mg}/\text{L}$ (F-11, F-14, F-23) et $22 \text{ mg}/\text{L}$ (F-06) pour la campagne de mai 2015 et entre $2 \text{ mg}/\text{L}$ (F-10) et $17 \text{ mg}/\text{L}$ (F-16) pour la campagne de janvier 2014.

Les teneurs en magnésium oscillent entre $2 \text{ mg}/\text{L}$ (F-08) et $15 \text{ mg}/\text{L}$ (PTS-03) pour la campagne de décembre 2016, entre $6 \text{ mg}/\text{L}$ (F-05) et $14 \text{ mg}/\text{L}$ (F-21) pour la campagne de mai 2015 et entre $10 \text{ mg}/\text{L}$ (ES-02, PTS-02, F-01, F-09, F-13) et $19 \text{ mg}/\text{L}$ (F-08) pour la campagne de janvier 2014.

Les analyses chimiques mettent en évidence des teneurs en potassium comprises entre $0,64 \text{ mg}/\text{L}$ (PTS-01) et $8,9 \text{ mg}/\text{L}$ (F-07) pour la campagne de décembre 2016, entre $1,9 \text{ mg}/\text{L}$ (F-04) et $8,2 \text{ mg}/\text{L}$ (F-02) pour la campagne de mai 2015 et entre $0,9 \text{ mg}/\text{L}$ (F-01) et $6,6 \text{ mg}/\text{L}$ (F-01) pour la campagne de janvier 2014. D'une manière générale, les eaux souterraines présentent rarement des teneurs en potassium supérieures à $10 \text{ mg}/\text{L}$. Les teneurs en sodium dans les eaux oscillent entre $0,03 \text{ mg}/\text{L}$ (F-08) et $2,14 \text{ mg}/\text{L}$ (PTS-03) pour la campagne de décembre 2016, entre $0,1 \text{ mg}/\text{L}$ (F-04, F-06, F-08, F-11, F-23) et $0,9 \text{ mg}/\text{L}$ (F-13) pour la campagne de mai 2015 et entre $0,05 \text{ mg}/\text{L}$ (F-13) et $0,26 \text{ mg}/\text{L}$ (F-15) pour la campagne de janvier 2014. Dans ce cas-ci les teneurs très faibles sensiblement nulles montrent que la nappe n'est pas exposée aux différentes activités de surface (maraîchage, abattoir...).

Les teneurs en chlorures des eaux varient de $0,02 \text{ mg}/\text{L}$ (F-07) à $18,52 \text{ mg}/\text{L}$ (F-20) pour la campagne de décembre 2016, de $3,98 \text{ mg}/\text{L}$ (F-01) à $24,50 \text{ mg}/\text{L}$ (F-20) pour la campagne de mai 2015 et de $2 \text{ mg}/\text{L}$ (F-14) à $21,1 \text{ mg}/\text{L}$ (F-02) pour la campagne de janvier 2014. Il faut noter que la présence des chlorures dans les eaux dépend du type de terrain traversé et de l'eau de pluie [21].

Les teneurs en sulfates des eaux varient de 4,98 mg/L (ES-02) à 48,37 mg/L (F-06) pour la campagne de décembre 2016, de 10,81 mg/L (F-18) à 64,63 mg/L (F-17) pour la campagne de mai 2015 et de 5,1 mg/L (F-03) à 37,5 mg/L (F-05) pour la campagne de janvier 2014.

Les teneurs en bicarbonates des eaux oscillent entre 10,8 mg/L (ES-02) et 88,54 mg/L (F-10) pour la campagne de décembre 2016, entre 30,39 mg/L (F-23) et 72,92 mg/L (F-06) pour la campagne de mai 2015 et entre 22,8-mg/L (ES-03) et 85,9 mg/L (ES-01) pour la campagne de janvier 2014. C'est l'élément le plus abondant dans tous les échantillons.

Les teneurs en nitrates sont très faibles dans les eaux étudiées. Elles sont comprises entre 0,4 mg/L (PTS-03) et 7,56 mg/L (F-02) pour la campagne de décembre 2016, entre 2,09 mg/L (F-19) et 24,92 mg/L (F-17) pour la campagne de mai 2015 et entre 0,1 mg/L (ES-01, ES-02, PTS-01, F-01, F-02 et F-08) et 3,2 mg/L (F-04) pour la campagne de janvier 2014.

Les teneurs en fer total oscillent entre 0,02 mg/L et 0,17 mg/L pour la campagne de décembre 2016, de 0,1 mg/L à 0,8 mg/L pour la campagne de mai 2015 et entre 0 à 0,7 mg/L pour la campagne de janvier 2014. La présence de fer dans l'eau peut favoriser la prolifération de certaines souches de bactéries qui précipitent le fer ou corrodent les canalisations.

Les teneurs en manganèse oscillent entre de 0,008 mg/L et 1,12 mg/L pour la campagne de décembre 2016, entre 0,010 mg/L et 0,022 mg/L pour la campagne de mai 2015 et entre 0,01 et 0,023 mg/L pour la campagne de janvier 2014.

La teneur en fluor dépend beaucoup du temps de contact de l'eau avec les minéraux fluorés de l'aquifère. Elle est plus élevée dans les nappes captives. Dans notre cas les teneurs sont faibles pour les trois campagnes. Ces teneurs oscillent entre 0,02 mg/L et 0,17 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; de 0,1 mg/L à 0,8 mg/L pour la campagne de mai 2015 et entre 0 à 0,7 mg/L pour la campagne de janvier 2014.

Tableau 1. Paramètres statistiques des données physico-chimiques en mg/L.

Campagne de décembre 2016												
	pH	THt	TDS	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Mini	4,88	2	82	18	3,87	2	0,64	0,03	10,8	0,02	4,98	0,4
Maxi	8,01	11	170	41	23	14	8,9	2,14	88,54	18,52	48,37	7,6
Moy	6,15	7,54	100,58	29,65	13,79	9,70	4,89	0,22	51,12	2,94	26,76	3,11
Ecart-type	0,82	2,10	34,13	7,07	5,34	3,28	2,09	0,43	17,54	4,70	9,90	2,28
CV (%)	13,33	27,85	33,93	23,84	38,72	33,81	42,74	195,4 5	34,31	159,8 6	37	73,31
Campagne de mai 2015												
	pH	THt	TDS	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Mini	4,12	6	91,48	14	9	6	1,9	0,1	30,39	3,98	10,81	2,09
Maxi	5,58	10	148	40	22	14	8,2	0,9	72,92	24,5	64,63	24,92
Moy	4,75	7,76	117,84	25,6	14,6	9,88	5,02	0,28	44,44	12,63	23,68	5,10
Ecart-type	0,45	1,13	16,24	8,73	3,83	2,14	1,45	0,26	10,13	6,51	11,18	4,59
CV (%)	10,05	14,56	13,78	34,10	26,23	21,66	28,88	92,86	22,79	51,54	47,21	90,00
Campagne de janvier 2014												
	pH	THt	TDS	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Mini	4,01	6	102	58	2	9	0,9	0,08	22,8	2	5,1	0,1
Maxi	6,8	11	154	338	17	19	6,6	0,3	95,1	32	37,5	3,2
Moy	4,79	8,27	115,55	135,1 4	10,86	13,5	3,53	0,14	58,60	10,60	16,86	0,5
Ecart-type	0,85	1,24	19,04	114,9 2	3,43	2,74	1,61	0,06	17,94	7,60	9,94	0,72
CV (%)	17,74	14,99	16,48	85,04	31,58	20,30	45,61	42,86	30,61	71,70	58,96	69,44

Des corrélations établies (Tab. 2) entre les différentes variables chimiques des eaux de la nappe, montrent que les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^-) sont bien corrélés avec la minéralisation totale (TDS).

Toutefois, la bonne corrélation entre les teneurs en ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^-) montre que la minéralisation totale des eaux est essentiellement due à ces éléments et dès lors, ils participent significativement à l'augmentation de la charge saline.

D'autre part, les teneurs en K^+ , Na^+ , NO_3^- et Cl^- n'augmentent pas avec la charge saline, et ne sont donc pas très déterminantes dans la minéralisation des eaux.

Toutefois, la bonne corrélation entre les teneurs en ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^-) montre que la minéralisation totale des eaux est essentiellement due à ces éléments et dès lors, ils participent significativement à l'augmentation de la charge saline. D'autre part, les teneurs en K^+ , Na^+ , NO_3^- et Cl^- n'augmentent pas avec la charge saline, et ne sont donc pas très déterminantes dans la minéralisation des eaux.

Chaque cellule de cette matrice de corrélation présente une valeur correspondant à la force et le sens du lien entre la variable de la ligne où la cellule se trouve et la variable de la colonne où la cellule se trouve.

La valeur positive ou négative fournit des informations sur le sens du lien et en valeur absolue c'est-à-dire sans tenir compte du signe + ou - ; cette valeur fournit des informations sur la force du lien.

Ainsi, lorsque la valeur est positive, il y a existence d'un lien direct entre deux (2) variables c'est-à-dire si une variable augmente, l'autre variable augmente aussi. Lorsque la valeur est négative, il y a existence d'un lien inverse entre deux (2) variables c'est-à-dire si une variable augmente, l'autre diminue.

Pour déterminer les familles et faciès géochimiques des eaux souterraines et de surface exploitées dans la partie nord de Brazzaville, les données des analyses chimiques sont projetées sur les diagrammes triangulaires de [15] (Fig. 5).

Pour la campagne de décembre 2016, dans le diagramme quadrangulaire, nous avons d'une part une prédominance des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes et d'autre part les eaux chlorurées et sulfatées. Cependant, dans le diagramme triangulaire des anions, les points d'eaux montrent une prédominance des points à évolution vers le pôle bicarbonaté où la quasi-totalité des points d'eau sont concentrés, des points qui sont décalés vers le pôle sulfaté (F-06, F-07) et des points d'eau à évolution vers le pôle à faciès mixtes (aucune prédominance d'un anion sur l'autre) (ES-02, F-19, F-20). Enfin, dans le diagramme triangulaire des cations, les points d'eaux se répartissent en trois groupes : le premier vers le pôle magnésien où la quasi-totalité des points d'eaux sont concentrés, le deuxième vers le pôle calcique, et le

troisième vers la zone centrale mixte de non prédominance des différents cations (ES-02).

- alors que pour la campagne de mai 2015, les eaux étudiées sont à prédominance chlorurées et sulfatées, et qu'elles sont faiblement minéralisées. Dans le diagramme triangulaire des anions, les points d'eau montrés évoluent vers le faciès mixte (aucun anion n'est dominant sur l'autre) et dans le diagramme triangulaire des cations, les points d'eaux sont à prédominance magnésienne.

Le faciès chloruré-sulfaté peut s'expliquer par la présence des chlorures, sulfates, sodium et potassium lié certainement au lessivage de ces ions contenus dans le sol par l'eau de pluie au cours de l'infiltration et/ou à la dissolution de minéraux évaporitiques.

Le faciès bicarbonaté calcique magnésien peut s'expliquer par la présence des formations calcaires et dolomitiques dans l'aquifère. En effet la dissolution de la calcite et/ou de la dolomite entraîne la solubilisation des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- .

- pour la campagne de janvier 2014, dans le diagramme quadrangulaire, les eaux se répartissent en deux grandes familles : nous avons d'une part les eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes et d'autre part les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes. Dans le diagramme triangulaire des anions, il y a une prédominance des points d'eau vers le pôle bicarbonaté, certains points d'eau sont décalés vers le pôle chloruré. Cependant on ne remarque aucune prédominance d'un anion sur l'autre des points d'eau à évolution vers le pôle à faciès mixtes. Enfin, dans le diagramme triangulaire des cations, les points d'eau se répartissent en trois groupes : le premier groupe à évolution vers le pôle magnésien où la quasi-totalité des points d'eau sont concentrés, le second à évolution vers le pôle calcique, le troisième à évolution vers la zone centrale mixte de non prédominance des différents cations.

La comparaison des trois diagrammes de Piper (Fig.5) des eaux permet de constater qu'il y a eu changement de classification de faciès chimiques, des anions et des cations au cours des trois campagnes de prélèvement. Les points d'eau qui se répartissaient d'une manière générale en deux faciès (bicarbonaté calcique et magnésien d'une part et d'autre part chloruré et sulfaté) sur les diagrammes triangulaires de Piper en janvier 2014 et en décembre 2016.

L'évolution du faciès bicarbonaté calcique et magnésien vers le faciès chloruré et sulfaté pour la campagne de mai 2015, serait liée au cours de la dernière campagne d'une augmentation des teneurs en sulfate et d'une diminution de teneurs en bicarbonates et en calcium

Tableau 2. Matrices de corrélation des données physico-chimiques des eaux

Campagne de janvier 2014									
	TDS	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
TDS	1,00								
HCO ₃ ⁻	0,78	1,00							
Cl ⁻	-0,44	-0,66	1,00						
SO ₄ ²⁻	0,41	-0,10	-0,29	1,00					
NO ₃ ⁻	0,23	0,29	-0,08	0,19	1,00				
K ⁺	0,25	0,37	-0,02	0,26	-0,12	1,00			
Na ⁺	-0,16	0,39	-0,15	0,11	-0,11	0,21	1,00		
Mg ²⁺	0,61	0,00	-0,08	0,32	0,27	-0,09	-0,08	1,00	
Ca ²⁺	0,55	0,02	-0,18	0,22	0,03	0,13	-0,24	-0,20	1,00

Campagne de mai 2015									
	TDS	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
TDS	1,00								
HCO ₃ ⁻	0,61	1,00							
Cl ⁻	0,01	-0,05	1,00						
SO ₄ ²⁻	0,49	-0,13	-0,52	1,00					
NO ₃ ⁻	0,06	-0,19	-0,20	-0,05	1,00				
K ⁺	0,35	0,17	0,37	0,30	0,2	1,00			
Na ⁺	0,45	0,24	-0,08	0,31	-0,04	0,24	1,00		
Mg ²⁺	0,40	0,05	0,34	0,35	-0,24	0,17	0,36	1,00	
Ca ²⁺	0,70	0,50	-0,16	-0,11	0,17	0,06	0,10	-0,33	1,00

Campagne de décembre 2016									
	TDS	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
TDS	1,00								
HCO ₃ ⁻	0,94	1,00							
Cl ⁻	-0,44	-0,50	1,00						
SO ₄ ²⁻	0,82	0,61	-0,56	1,00					
NO ₃ ⁻	0,56	0,63	-0,55	0,33	1,00				
K ⁺	0,16	-0,06	0,12	0,28	0,06	1,00			
Na ⁺	-0,41	-0,35	0,11	-0,38	-0,05	-0,36	1,00		
Mg ²⁺	0,67	0,09	0,05	0,40	0,20	-0,11	-0,39	1,00	
Ca ²⁺	0,83	0,73	-0,60	0,82	0,13	0,18	-0,27	0,18	1,00

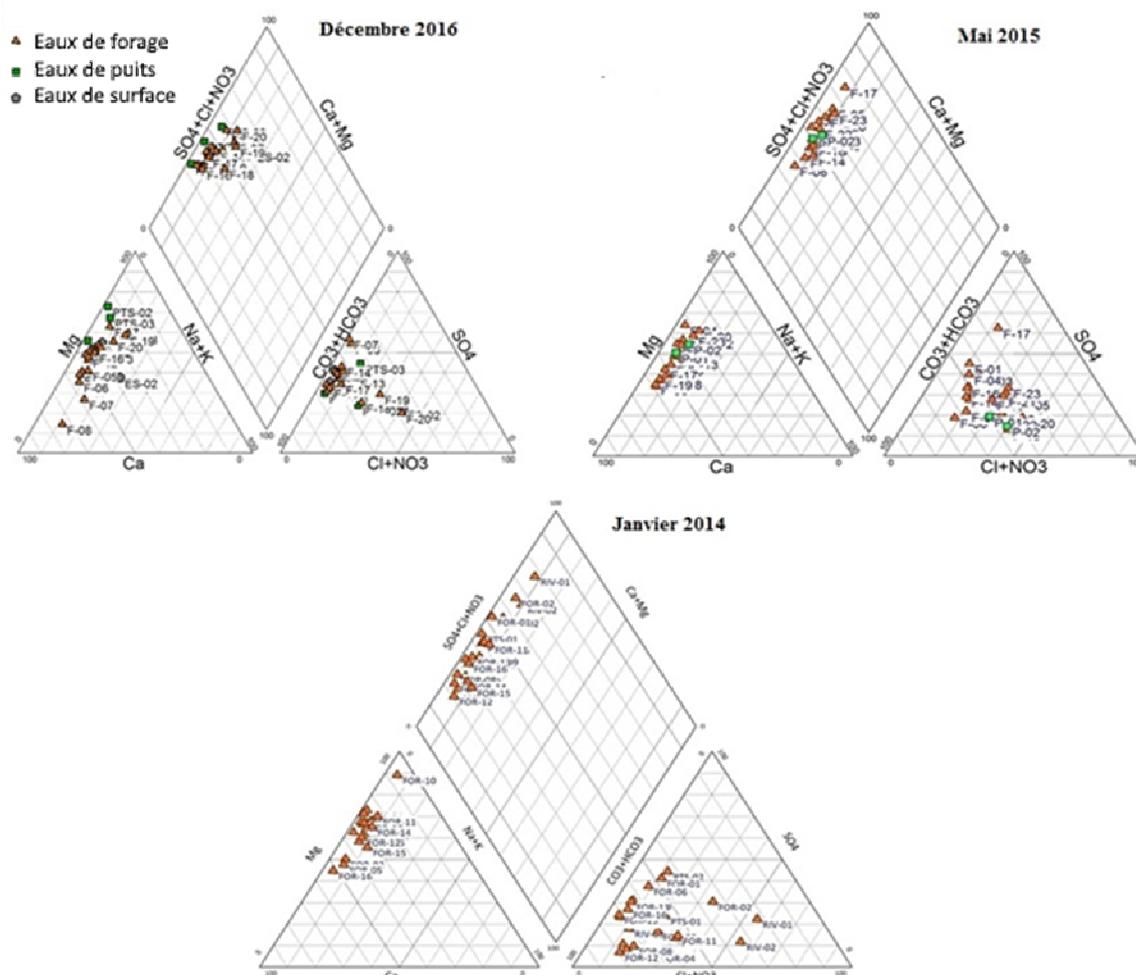


Figure 5. Classification dans le diagramme de Piper des eaux souterraines et de surface

3.2. Origines et processus de la minéralisation des eaux

3.2.1. Les Indices de Saturation des phases minérales

Les indices de saturation (IS) des eaux souterraines et de surface vis-à-vis des phases minérales (Anhydrite (CaSO_4), Aragonite (CaCO_3), Calcite (CaCO_3), Dolomite ($\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$) et Gypse (CaH_2SO_4) ont été calculés pour les trois campagnes d'échantillonnage (décembre 2016, mai 2015 et janvier 2014) à partir du programme WATEQ [22, 23].

Les indices de saturation permettent d'apprécier les phénomènes de dissolution et de précipitation des minéraux présents dans les eaux souterraines selon que les valeurs des indices de saturation d'une solution sont négatives ou positives. L'état d'équilibre ou de saturation d'une solution par rapport à un minéral donné est souvent caractérisé par un indice de saturation (I_s).

La Figure 6 traduisant la relation entre les indices de saturation et le TDS permet de déterminer : l'état de saturation formé par une bande comprise entre les indices de saturation -1 et 1. La zone située au-dessus de cette bande caractérise l'état de sursaturation et

l'état de sous-saturation se situe en dessous de cette bande [24].

En effet, pour les trois campagnes étudiées, les eaux souterraines et de surface sont sous-saturées en anhydrite, gypse, dolomite, aragonite et calcite.

Pour l'état de sous-saturation, les phases minérales de ces éléments, si elles existent dans la matrice de l'aquifère, peuvent être facilement solubilisées au contact de la nappe.

L'état de saturation des eaux souterraines par rapport aux phases minérales, indique que ces eaux sont en équilibre avec les différentes phases solides de ces minéraux.

L'état de sursaturation par rapport aux phases minérales, indique que si celles-ci existent, les eaux souterraines peuvent permettre une précipitation de ces phases minérales.

Il faut noter cependant que la solubilité d'un minéral peut être diminuée si une autre source d'apport de l'un des ions de la dissociation est en jeu ce qui augmenterait la valeur de l'indice de saturation I_s . Or des ions HCO_3^- peuvent être produits dans la nappe par l'intermédiaire du CO_2 dissous dans l'eau.

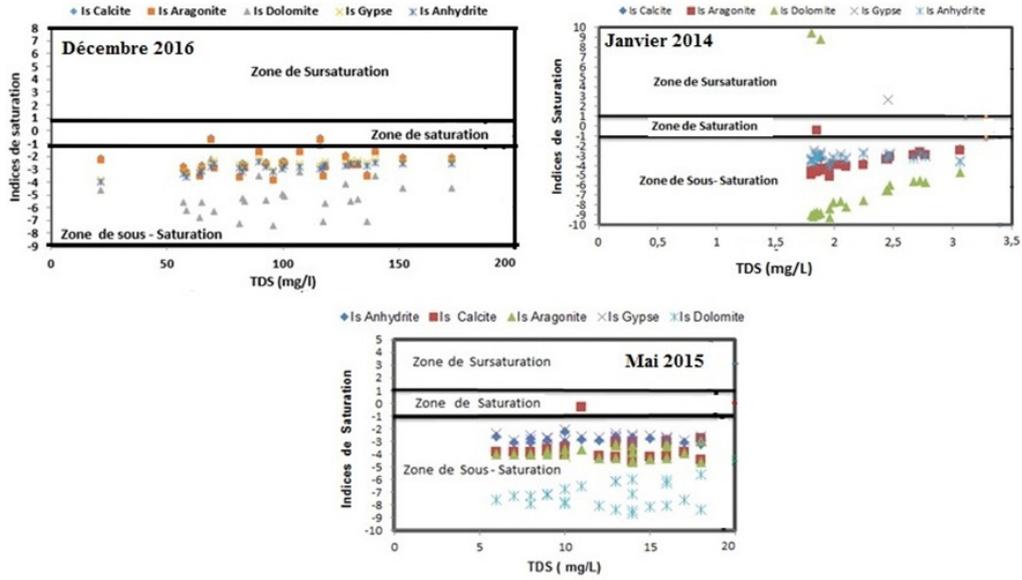


Figure 6. Evolution des indices de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques par rapport au TDS des eaux

3.2.2. Indices Diagramme binaire de dissolution $[HCO_3^- + SO_4^{2-}]$ vs $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$.

L'effet de la dissolution des minéraux carbonatés peut être mis en évidence par la relation entre $[HCO_3^- + SO_4^{2-}]$ vs $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ (Fig. 7). Les diagrammes binaires permettent de comprendre l'origine des eaux et d'identifier les processus géochimiques responsables de la variation de la minéralisation des eaux souterraines.

Cette relation montre nettement que ce sont les points d'eau placés proches ou sur de la

droite de pente 1 dite la droite théorique de dissolution des minéraux argileux, qui sont concernés par le phénomène de dissolution. Pour les trois campagnes, les points se rapprochent ou situés sur la droite de pente 1. Cela signifie que les phénomènes de dissolution et un autre phénomène qui peut être anthropique ont participé à cette minéralisation ; l'aquifère libère ses alcalins et s'enrichit en alcalino-terreux.

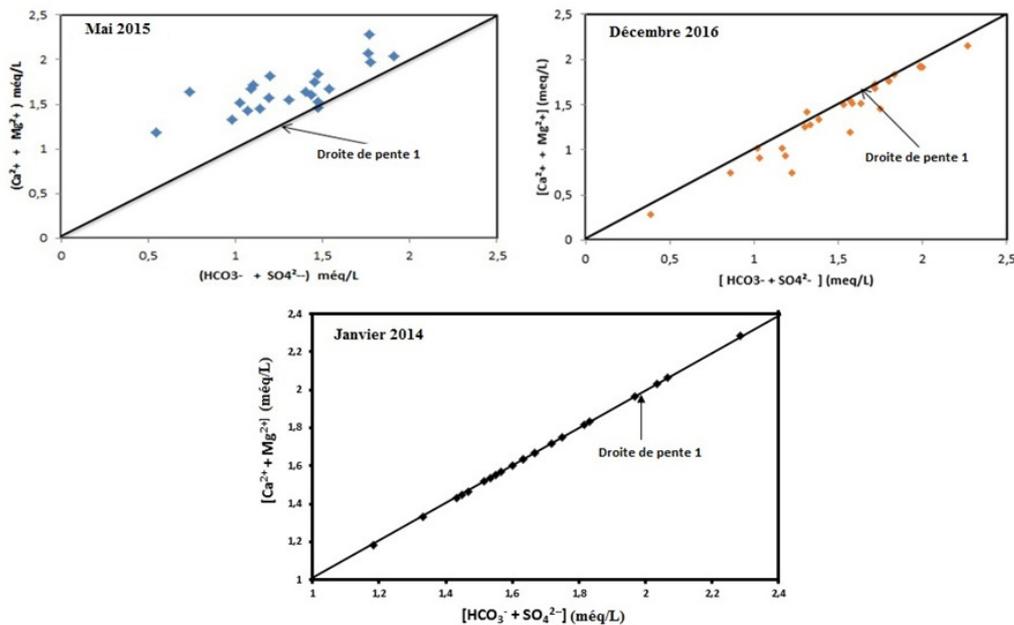


Figure 7. Diagramme binaire $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ vs $[HCO_3^- + SO_4^{2-}]$ des eaux

3.2.3. Diagramme binaire $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})]$ vs $[(Na^+ + K^+) - Cl^-]$.

On parle souvent des échanges de base avec les minéraux argileux qui existent dans les formations aquifères et les eaux souterraines. Ces échanges concernent les minéraux argileux ayant la possibilité de fixer des ions par adhésion et de libérer d'autres selon la charge électrique existant entre les feuillets des minéraux argileux et l'état de saturation de la solution. Les échanges de base qui caractérisent les eaux souterraines sont mis en évidence par la relation entre $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})]$ vs $[(Na^+ + K^+) - Cl^-]$ représentée par la Figure 8 [25]. Cette relation met uniquement l'accent sur les réactions pouvant exister entre les minéraux argileux et la solution, en se débarrassant des ions issus éventuellement d'autres réactions de dissolution des minéraux carbonatés et évaporitiques. Cette figure permet de mettre en évidence les processus de la minéralisation des eaux souterraines pendant l'infiltration des eaux de pluie et/ou durant leur séjour au sein de l'aquifère lui-même. Dans le cas d'absence de ces réactions, tous les points représentant les échantillons doivent se placer près du point d'origine [26].

Quatre zones sont énumérées dans ces figures :

les zones 1 et 2, où la différence entre les ions (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et les ions ($HCO_3^- + SO_4^{2-}$) est positive, montrent que les processus d'échange inverse de bases et la dissolution des minéraux carbonatés dominent. Les rapports négatifs sont dus à la rétention des alcalins au niveau des argiles et les rapports positifs à un apport d'ions Na^+ et K^+ . Cet apport reste cependant faible à cause de fortes perméabilités. Ce processus est observé pour les trois campagnes d'échantillonnage de décembre 2016, mai 2015 et janvier 2014 ;

- les zones 3 et 4, où la différence entre les ions (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et les ions ($HCO_3^- + SO_4^{2-}$) est négative, indiquent qu'il y'a une forte production de HCO_3^- et/ou de SO_4^{2-} par l'intermédiaire du CO_2 par la dissolution de minéraux sulfatés. Cette minéralisation peut être aussi liée aux processus d'échanges de bases. Dans ces zones, on a une libération des ions Na^+ et K^+ et une rétention des alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) au niveau des argiles. Ce processus est observé que pour la campagne de prélèvements de décembre 2016.

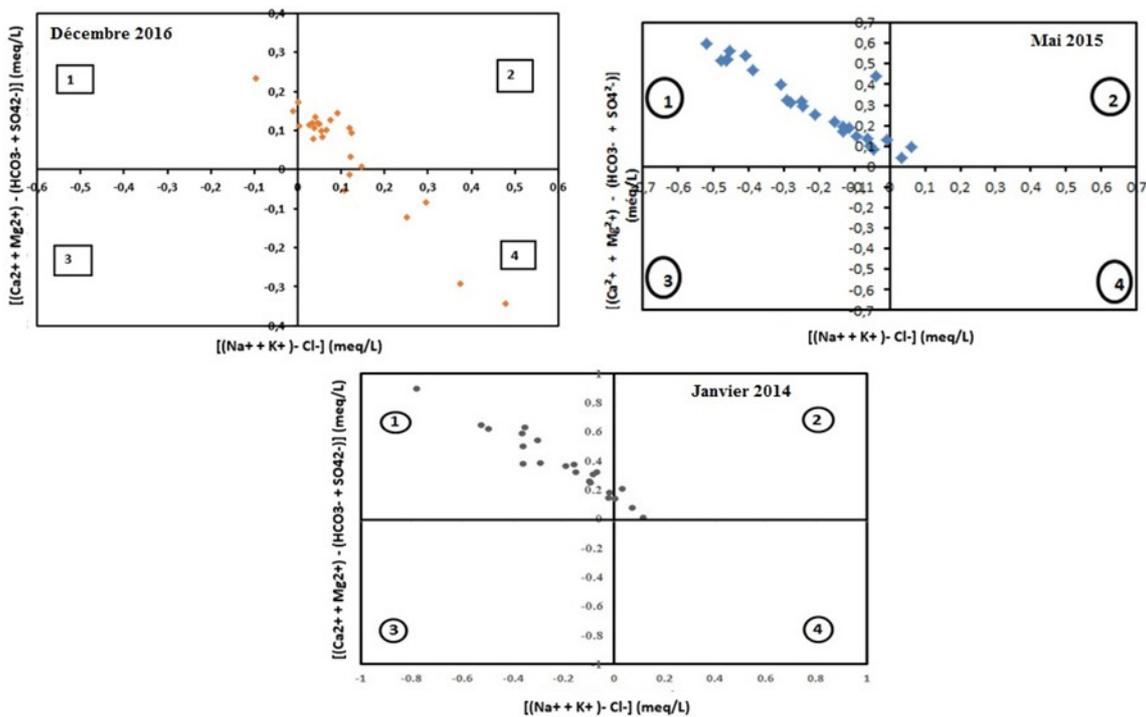


Figure 8. Diagramme binaire $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})]$ vs $[(Na^+ + K^+) - Cl^-]$ des eaux

3.2.4. Diagramme

Afin de faire la synthèse des différents processus géochimiques contrôlant la minéralisation des eaux souterraines et de surface, les points d'eau ont été reportés sur le diagramme de [16]. En effet, ce diagramme diffère des diagrammes triangulaires de Piper et de Durov étendu par le fait que les triangles équilatéraux sont éliminés et que la forme du domaine principal d'étude est différente. Ce diagramme est

construit à partir de la différence en pourcentage des milliéquivalents entre les alcalino-terreux ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) et les alcalins ($Na^+ + K^+$), exprimés comme des teneurs en pourcentage réactionnel, sur l'axe des X, et de la différence en pourcentage des milliéquivalents entre les anions d'acides faibles ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$) et les anions d'acides forts ($Cl^- + SO_4^{2-}$), exprimés aussi comme des teneurs en réaction en pourcentage, sur l'axe des Y. Les différences en pourcentage des

milliéquivalents des coordonnées (X et Y) sont par la suite étendues dans les principaux sous-domaines d'étude du diagramme, qui définit le caractère de l'ensemble des eaux souterraines. Ainsi, les données des analyses chimiques des eaux souterraines et de surface des trois campagnes de prélèvement dans les sous domaines suivants (Fig. 9) :

- le sous domaine 5, où les alcalino-terreux et les anions d'acides faibles dominent à la fois les métaux alcalins et les anions d'acides forts.

Dans ce sous domaine, les eaux ont une dureté temporaire et les points représentent les eaux de type

bicarbonaté calcique et magnésien où le processus responsable de la minéralisation est la recharge ;

- le sous domaine 6, où les alcalino-terreux dominent les métaux alcalins et les anions d'acides forts dominent les anions d'acides faibles. Dans ce sous domaine, les eaux ont une dureté permanente et ne favorisent pas le dépôt de résidus de carbonates de sodium en cas d'irrigation. Ces eaux qui sont de type chloruré calcique et magnésien résultent soit de la pollution, soit des processus d'échange inverse de base

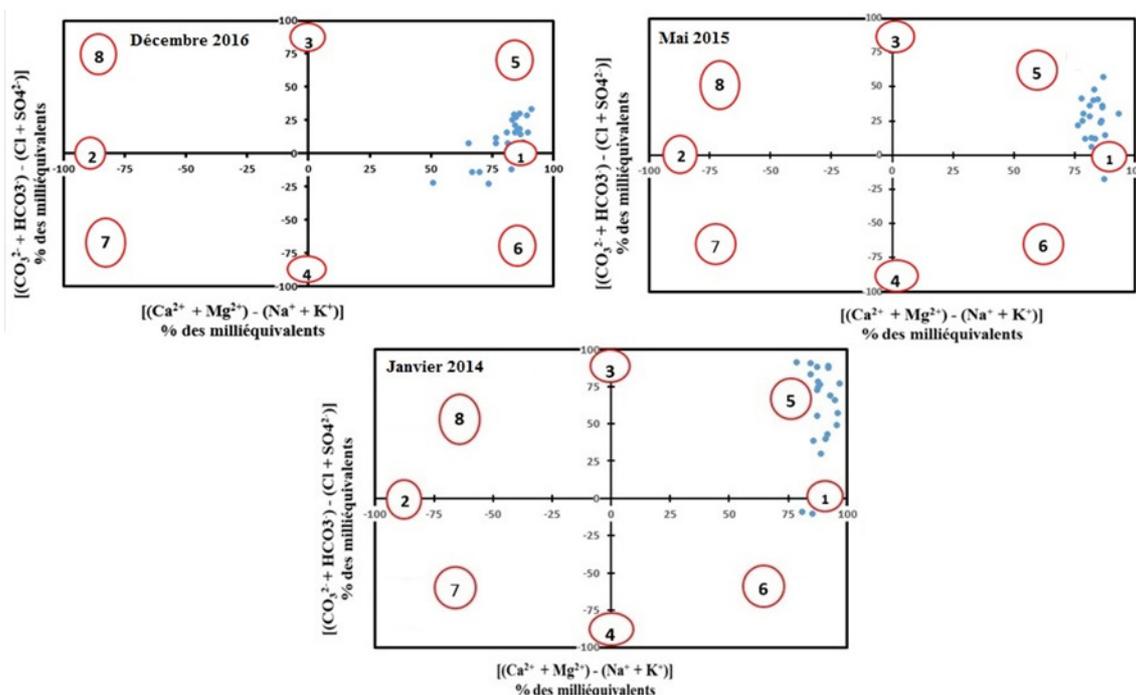


Figure 9. Classification et les processus de minéralisation des eaux souterraines et de surface

3.3. Discussion

L'étude des paramètres physico-chimiques issus de la campagne de décembre 2016 des eaux souterraines et de surface, a montré que ces eaux ont des valeurs de pH qui oscillent entre 4,88 (F-5) et 8,01 (F-08, F-17). Ces valeurs de pH enregistrées, indiquent que les eaux souterraines et de surface sont acides d'une part et légèrement basique d'autre part. Ce résultat est différent de celui obtenu par [27] lors de la campagne de janvier 2014 et [3] lors de la campagne de mai 2015. La minéralisation totale des eaux souterraines et de surface, évaluée par les mesures de la conductivité électrique et du total en solides dissous (TDS) a montré que ces eaux sont douces car leurs TDS s'échelonnent de 82 mg/L (F-13) à 170 mg/L (F-03) et faiblement minéralisées car leurs conductivités électriques sont comprises entre 18 μ S/cm (F-19) et 41 μ S/cm (ES-03). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par [27] et [3], respectivement lors des campagnes de janvier 2014 et de mai 2015.

Du point de vue familles chimiques, les eaux souterraines et de surface de la campagne de décembre

2016, sont caractérisées par deux (2) familles chimiques : les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes et les eaux chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par [27], lors de la campagne de janvier 2014 et par [3], lors de la campagne de mai 2015.

L'enrichissement en chlorures et en sulfates serait probablement le résultat de la dissolution pendant la saison des pluies (période des hautes eaux) des minéraux sulfatés comme le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite (CaSO_4). Cependant, l'enrichissement en calcium et en magnésium serait probablement dû aux échanges entre les alcalins (sodium et potassium) de la nappe contre les alcalino-terreux (calcium et magnésium) des permutolites (formations argileuses) c'est-à-dire qu'il y'a une fixation des alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}) et une solubilisation des alcalins (Na^+ , K^+).

Du point de vue origine et processus de la minéralisation, les différentes relations établies entre les différents ions majeurs ont révélé que la minéralisation des eaux de la partie Nord de

Brazzaville serait contrôlée par les phénomènes de dissolution et les échanges de base cationiques entre la nappe et les permutolites. Ce résultat concorde avec ceux obtenus par Essouli Kessimpou (2017), Andzaye Ossana (2015) et Moukolo (1992).

4. Conclusion

La présente étude se veut une contribution à la connaissance des caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines et de surface dans la partie nord de Brazzaville et, se propose de déterminer l'origine et les processus de minéralisation des eaux souterraines et de surface.

La physico-chimie des eaux pour les trois campagnes d'échantillonnage, montre que ces eaux sont faiblement minéralisées avec les valeurs de la conductivité électrique variables. Ces valeurs oscillent entre 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 41 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la campagne de décembre 2016, de 14 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la campagne de mai 2015 et de 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la campagne de janvier 2014.

La classification des eaux souterraines et de surface sur la base des valeurs du TDS, montre que les eaux sont douces avec les valeurs de TDS variant de 82 mg/L à 170 mg/L pour la campagne de décembre 2016, de 91 mg/L à 148 mg/L pour la campagne de mai 2015 et de 76 mg/L à 154 mg/L pour la campagne de janvier 2014. Le pH des eaux sont dans l'ensemble acides à légèrement neutres, indiquant que l'alcalimétrie des eaux est contrôlée essentiellement par les bicarbonates (HCO_3^-).

La classification des eaux à partir du diagramme triangulaire de [12], montre que les eaux souterraines et de surface sont caractérisées par deux (2) familles chimiques : la famille chlorurée sulfatée calcique et magnésienne et la famille bicarbonatée calcique et magnésienne.

La projection sur le diagramme de [16] des points d'eau a permis de mettre en évidence les différents processus contrôlant la minéralisation des eaux souterraines et de surface : les processus d'échanges de base entre les alcalino-terreux et les alcalins, les phénomènes de dissolution, la recharge et les apports liés aux activités anthropiques

REFERENCES

- [1] Castany, G. "Principes et méthodes de l'hydrogéologie", Edition Dunod, Paris, 1982, 236 p.
- [2] Moukolo N. (1992). "Etat de connaissances actuelles sur l'hydrogéologie du Congo", Journal Hydrogéologie, 1-2, pp. 47-58.
- [3] Essouli Kessimpou, P. "Contribution à l'étude hydrochimique des eaux souterraines exploitées dans la partie nord de Brazzaville : Origine de la minéralisation et qualité physico-chimique et bactériologique", Mémoire de Master des Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI de Brazzaville, Congo, 2017.
- [4] Ghenassia, J. C., Tati, L., Renaudeau, M., De La Chanonie, H. Visage du Congo. Paris, 1974, p. XXVII.
- [5] Giresse P. (1990). "Paleoclimatic and structural environment at the end of the Cretaceous along the western flank of the Congo Basin, with application of underground microdiamonds around Brazzaville", Journal of African Earth Sciences, 10, pp. 399-408.
- [6] Mouyoungou, J. "Les silicifications mésozoïques et cénozoïques de la bordure occidentale du bassin de Paris et la région de Brazzaville au Congo", Thèse de doctorat, Angers, 1990, 239 p.
- [7] Cosson, J. "Notice explicative sur les feuilles Pointe-Noire et Brazzaville". Carte géologique de reconnaissance au 1/500.000. Direct. Mines et Géol. A.E.F. Brazzaville, 1955, 56 p.
- [8] Desthieux, F. Ministère des Mines et de l'Energie, Direction Générale des Mines." Notice explicative de la carte géologique de la République du Congo au 1/1.000.000", 1993, 1-2, pp. 4-8.
- [9] Dadet, P. "Notice explicative de la carte géologique de la république du Congo Brazzaville au 1/500 000. Zone comprise entre les parallèles 2° et 5° Sud", Mém. BRGM, Paris, France, 1969, 70, 103 p.
- [10] Boudzoumou, F. "La chaîne ouest Congolienne et son avant pays au Congo : Relation avec le Mayombien, Sédimentologie des séquences d'âge protérozoïque supérieur", Thèse doctorat 3ème cycle, Univ. d'Aix Marseille II, 1986.
- [11] Mestraud, J-L. Carte géologique de la République Centrafricaine au 1/1500000. BRGM, Paris, 1964.
- [12] Le Marechal, A. "Contribution à l'étude des plateaux Batékés (Géologie, géomorphologie, hydrogéologie)", Rapport de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Centre de Brazzaville, Service Géologique, 1966, 78 p.
- [13] Thieblemont D. (2013). "Evidence for an aeolian origin of the Holocene lateritic surface cover of Gabon", Quat. Int. 296, 176-197.
- [14] Miyouna T., Maloungou D. M., Essouli O. F., Ndembé-Ndembé A. J., Moussiessié J., Kinga Mouzéo., Boudzoumou F. (2016). "Etude paléoenvironnementale des dépôts détritiques de la formation de couverture du bassin côtier du Congo", Rev. CAMES - VOL.04 NUM.01. *ISSN 2424-7235.
- [15] Piper, A. M. "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses". Trans. Am. Geophys. Union, 1944, 25, 914-923.
- [16] Chadha D. K. (1999). "A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data", Hydrogeology Journal, 7, pp. 431-439.
- [17] Kirchmer J. C. (1983). "Quality control in water analyses", Environmental Science and Technology, 17 (4), pp. 178-181.
- [18] Fetter, C. W. "Applied hydrogeology", Prentice Hall Inc., New Jersey (USA), 1994, 691 p.
- [19] Essouli, O. F. "Impact de la décharge publique du lac Mbeubeuss sur les ressources en eau de l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye (Dakar, Sénégal)", Thèse de doctorat 3ème cycle, université C.A.D., Sénégal, (2005)
- [20] Banton, O., Bangoy, L. M., Chevalier, S., Houenou, P., Lafrance, P. et Rivard, C. "Hydrogéologie : Multiscience environnementale des eaux souterraines", Presses de l'Université du Québec / AUPELF, 1997, 460 p.
- [21] Beauchamp, J. "Qualité et pollution des eaux souterraines", Cours de DESS, Université de Picardie Jules Verne, France, 2006, 24 p.
- [22] Truesdell A. H., Jones B. F. (1974). "WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters", Journal Research USGS 2 (2), pp. 233-239.

[23] Plummer, L. N., Jones, B. F., Truesdell, A. H. "Wateq F, a Fortran IV version of Wateq, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters", US Geol Survey Water Res Invest., 1976, 76 (13).

[24] Dindane K., Bouchaou L., Hsissou Y., Krimissa M. (2003). "Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Souss Upstream Basin, southwestern Morocco", Journal of African Earth Sciences, 36 (4), pp. 315 - 327.

[25] Garcia M. G., Del V., Hidalgo M., Blesa M. A. (2001). "Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina", Hydrogeology Journal, 9 (6), 597-610.

[26] Mclean, w., Jankowski, j., Lavitt N. "Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia". In : Sililo O. et al. (eds). Groundwater, past achievement and future challenges. A. A. Balkema (Rotterdam), 2000, 567-573.

[27] Andzaye Ossona, A. "Contribution à l'étude hydrochimique des aquifères exploités dans la partie nord de la région de Brazzaville : entre l'avenue de la paix et la rivière Djiri", Mémoire de Master des Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI de Brazzaville, Congo, 2015.